

## 실내공기질 모델을 이용한 환기 시스템의 공기 정화 효율성 평가

최 성 우

계명대학교 환경학부

## Evaluation of Ventilation System Performance Using Indoor Air Quality Model

Sung-Woo Choi

Department of Environmental Science and Engineering  
Keimyung University, Taegu, Korea

### ABSTRACT

Successful energy conservation and good indoor air quality (IAQ) are highly dependent on ventilation system. Air filtration is a primary solution of indoor air control strategies in terms of reducing energy consumption and improving indoor air quality. A conventional system with bypass filter, as it is called variable-air-volume/bypass filtration system (VAV/BPFS), is a variation of the conventional variable air volume (VAV) systems, which is designed to eliminate indoor air pollutant and to save energy. Bypass filtration system equipped with a high-efficiency particulate filter and carbon absorbent provides additional cleaned air into indoor environments and maintain good IAQ for human health. The objectives of this research were to compare the relative total decay rate of indoor air pollutant concentrations, and to develop a mathematical model simulating the performance of VAV/BPFS. All experiments were performed in chamber under the controlled conditions. The specific conclusions of this research are: 1. The VAV/BPFS system is more efficient than the VAV system in removing indoor air pollutant concentration. The total decay rates of aerosol, and total volatile organic compound (TVOC) for the VAV/BPFS system were higher than those of the conventional VAV system. 2. IAQ model predictions of each pollutant agree closely with the measured values. 3. According to IAQ model evaluation, reduction of outdoor supply air results in decreased dilution removal rate and on increased bypass filtration removal rate with the VAV/BPFS. As a results, we recommends the VAV/BPFS as an alternative to conventional VAV systems.

**Keywords** : IAQ model, Ventilation system, VAV/BPFS, Total decay rate, CADR

### I. 서 론

1970년대의 에너지 파동으로 인한 실내 환경내의 열원 물질의 사용과 환기율의 감소는 실내공기질 (indoor air quality)을 악화시켰으며, 이로 인한 잠재적인 인체위해도(health risk)는 더욱 증가하였다.<sup>1,2)</sup> 실내공기 오염물질을 제거시키기 위한 방법으로는 실외 공기의 유입, 즉 환기율을 증가 시킴으로서 희석 효과에 따른 실내 오염물질의 제거방법과 공기 정화기를 이용하여 실내 오염물질을 여과하여 제거시키는 방법이 있다. 환기율에 따른 오염 물질

의 제거는 에너지 손실을 수반하므로 실내공기질의 제어는 공기 여과(air filtration)방법이 권고되고 있다.<sup>3,4)</sup> 즉 거주 공간내의 실내공기질과 에너지 손실은 환기 시스템과 직접적인 관련이 있으므로 환기 시스템의 선정시 매우 신중해야 한다.

실내공기질 문제는 유해성 실내 오염물질이 실내 공간에 누적되어 발생하며, 실내공기오염 물질의 누적 농도를 예측하기 위한 방법으로 물질 수지식을 이용한 방법과 회귀 분석을 이용한 통계적 방법이 있다. 통계적 방법을 이용한 실내공기질의 예측은 Drye 등<sup>5)</sup>의 연구가 있으며, Drye등은 다중 회귀 분

석에 의한 통계적 모델을 개발하여 미국의 5개 대도시의 실내 중의 NO<sub>x</sub>의 농도를 예측 분석하였다. 그러나 대부분의 실내공기 오염물질의 농도 예측 및 평가는 실내 오염물질의 제거기전, 환기율, 재순환율, 침기, 실내 발생원등을 조합한 물질 수지식을 이용한다. Turk<sup>20</sup>는 난실내의 실내공기질 모델을 개발하여 취기물질을 측정하였으며, Shair 등<sup>20</sup>과 Ishizu<sup>11</sup>의외 많은 연구자에 의해 실내공기질 모델이 개발, 보완되고 있다. 특히 Hayes<sup>22</sup>는 실내 오존의 농도를 각 실내환경의 특성에 따라 예측 분석하였으며, Spark<sup>19</sup>은 실내 오염물질의 발생원, 누기현상, heating, ventilating and air conditioning(HVAC) 시스템 및 공기정화기의 효율을 평가하기 위해 IAQ model version 1.0을 개발 보급하였다. 이와 같이 물질 수지를 이용한 실내공기질 모델은 실내오염물질의 누적 농도를 예측하는데 효과적으로 사용되며 환기 시스템의 실내 오염물질의 제거효율을 용이하게 평가할 수 있다.

본 연구에서 사용된 variable-air-volume/bypass filtration system (VAV/BPFS)은 기존의 variable-air-volume (VAV) 시스템의 변형으로 VAV 시스템 내에 필터 시스템을 우회시켜 장착하였으며 재순환공기와 실외공기를 동시에 정화함으로써 환기 시스템내의 에너지 소비량을 줄일 수 있도록 고안되었다. 본 연구는 시간의 변화에 따라 제어된 동일 조건하에서 VAV/BPFS와 기존의 VAV 시스템간의 실내 오염 물질의 총감소율을 비교측정하였고, 정화공간단말율을 이용한 실내공기질 모델을 개발하여 VAV/BPFS의 공기정화효율성을 평가하였다.

## II. 실험 방법

### 1. 실험 재료 및 방법

VAV/BPFS의 실내 오염물질의 감소효율을 측정하기 위해 모든 실험은 온도, 습도 및 유량을 조절할 수 있도록 설계되어 있는 32 m<sup>3</sup>의 알루미늄 chamber에서 수행하였다. 본 연구에서 개발된 VAV/BPFS는 chamber에 맞도록 구조 및 설계를 변경하였으며, 기존의 VAV 시스템과 VAV/BPFS가 선별적으로 작동하도록 하였다. 두 시스템을 비교하기 위하여 각 시스템을 chamber에 설치하였으며, 설치 방법은 매우 간단하였다. 모든 실험은 제어된 동일 조건하에서 수행하였으며 각 조건은 다음과 같다. 첫째, 실내 오염원으로는 담배와 냄새 제거용 스프레이를

사용하였으며, chamber내의 오염물질의 동일 배출량을 얻기 위해 담배 연기는 smoking machine을 사용하여 발생시켰으며, 냄새 제거제의 스프레이 시간은 일정하게 하였다. 둘째, chamber에 열량을 공급하기 위해 시중에서 판매하는 200 watts 전구를 다량 설치하여 인위적으로 공급 열량을 조절하였다. 각 200 watts의 전구는 chamber 내에 한 사람이 활동하여 발열되는 열량을 대표하며 각 400, 800, 1200, 1900 watts의 열량을 사용하였다. 셋째, 모든 실험은 여름철인 냉방 mode를 중심으로 진행하였으며, 각 시스템이 작동되기 위한 실내 온도는 24°C로 정하였다.

실내공기질은 실내 오염물질의 총 감소율로서 평가하였으며, 본 연구의 수행을 위해 단일 열량실험(100분)과 연속 열량실험(240분)을 반복적으로 3회씩 실행하였다. 각 실험은 실험 시작 직전에 chamber내의 열적 안정화를 취함과 동시에 배경 농도를 측정하였고, 실내 오염원과 도입 후 매 10분 간격으로 실내 오염물질의 농도와 실내 온도 변화량 및 공기량을 측정하였다. 실내 에어로졸은 MIE의 Model Ram-1 real-time aerosol monitor를, total volatile organic compounds(TVOC)는 HNU Model PI101 trace gas analyzer (HNU system)를 사용하여 측정하였으며, 실험 전후에 걸쳐 QA/QC를 하였다. 또한 chamber내의 온도와 시스템의 유량은 Model CT-830-D (HY-Cal Engineering) 과 Magnehelic Air Filter Gages (Dwyer)를 사용하였다.

### 2. 환기 시스템

일반적으로 환기 시스템의 주요 기능은 열적 쾌적성과 적정 실내공기질의 유지이다. 기존의 환기 시스템은 실내 공기의 온도 변화에만 반응하여 열적 쾌적성을 유지하나, 유해 오염 물질의 증가시 실내공기를 향상시키기 위한 특별한 제어 장치를 갖추지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서 사용된 VAV/BPFS는 우회 필터를 이용하여 적정 실내공기질을 유지하고 시스템의 에너지를 최소화하기 위해 개발되었다. VAV/BPFS는 크게 두가지 조절기, SZM 3000 zone controller (Zone-all Control Systems Inc.)와 IAQ sensor(Staefa Control System Inc.)로 구성되어 있다. SZM 3000은 실내외의 온도를 감지함으로써 실내공간의 열적 쾌적성을 유지하며 IAQ sensor는 실내공간의 적정 실내공기질을 유지한다. 특히 chamber내에 설치된 IAQ sensor는 실내의 유해성 오염물질의 농도를 감지하여 실내 오염

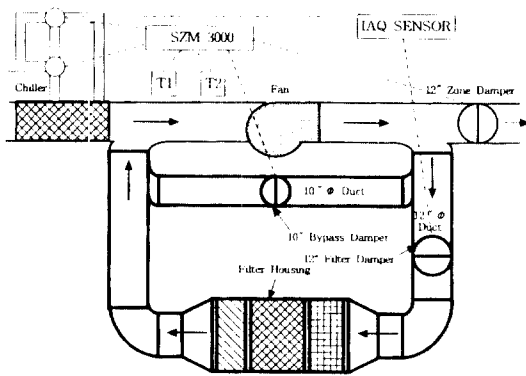


Fig. 1. Variable-air-volume/bypass filtration system.

도가 높을 경우 12 inch filter damper를 열고, 동시에 10 inch bypass damper를 닫아 재순환 공기 및 실외 공기를 동시에 정화한다. IAQ sensor는 VAV/BPFS mode에서만 작동하며 기존 VAV시스템에서는 작동하지 않도록 설계하였다. VAV/BPFS는 두 가지 종류의 필터를 가지고 있어, 실내의 먼지와 유해 유기물을 동시에 제거할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 고효율 분진 필터 (filter efficiency with 90 to 95 percent, Farr Company)와 활성탄 필터 (filter efficiency with 30 to 35 percent, Farr Company)를 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 실내 오염 물질의 총 감소율

실내공기질의 평가는 각 시스템 별로 실내 오염물질의 총 감소율로서 평가하였다. 총 감소율,  $K_t$ 는 실외 공기의 유입에 따른 오염 물질의 희석, 필터 또는 공기 정화기에 의한 오염 물질의 제거율등 실내공기

오염물질을 제거하기 위한 일련의 제거 기전을 포함한다. 각 시스템의 총 감소율의 구성 요소를 최소화하여 정의하면 다음과 같다.

$$K_{t, VAV} = K_o + K_n$$

$$K_{t, VAV/BPFS} = K_o + K_n + K_f$$

$K_{t, VAV}$ 는 VAV 시스템 사용시의 오염물질 총 감소율로서 실외공기 유입율( $K_o$ )과 자연 환기율( $K_n$ )로 구성된다.  $K_{t, VAV/BPFS}$ 는 VAV/BPFS 사용시의 오염물질의 총 감소율로서 실외공기 유입율( $K_o$ ), 자연 환기율( $K_n$ ), 공기 정화율( $K_f$ )로 구성된다. 각 시스템의 총 감소율  $K_t$ 는  $\ln C_t$ 와  $t$ 와의 선형 회귀식을 이용하여 구하였다.

$$K_t = \frac{(\sum t_i \ln C_{it}) - (\sum t_i)(\sum \ln C_{it})}{\sum t_i^2 - \frac{(\sum t_i)^2}{n}}$$

$K_n$ 은 자연 감소율(natural decay rate,  $hr^{-1}$ )로서  $C_t = C_o e^{-K_n t}$ 로 구하였다.  $C_{it}$ 는  $t=t_i$ 에서의 농도이며  $C_o$ 는  $t=0$ 에서의 초기 농도이다. 실내 오염물질의 총 감소율은 Table 1에 나타내었다. 각 시스템의 총 감소율은 chamber내의 열량에 비례하여 증가하였다. 실내 공간에서 열량의 증가는 각 환기 시스템의 실외공기의 유입량을 증가시켜 실내 오염 물질을 희석함으로써 총 감소율은 증가하게 된다. 또한 VAV/BPFS는 실외 공기의 유입이외에 재순환 공기를 유회 필터 시스템으로 정화하여 chamber내에 재공급함으로써 VAV 시스템에 비해서 공기 정화 효율이 매우 효과적임을 알 수 있다. 실내 에어로졸의 총 감소율은 기존 VAV 시스템 사용할 때에는  $2.45 hr^{-1}$ 에서  $3.77 hr^{-1}$ , VAV/BPFS를 사용할 때에는  $5.53 hr^{-1}$ 에서  $9.70 hr^{-1}$ 로 총 감소율은 약 2배 이상 증가하였

Table 1. Total decay rate on indoor aerosol and TVOC.

System	Energy (watts)	Indoor aerosol		TVOC	
		$K_t$ ( $hr^{-1}$ )	R <sup>2</sup>	$K_t$ ( $hr^{-1}$ )	R <sup>2</sup>
VAV	400	$\ln Conc = -2.45 t$	0.98	$\ln Conc = -2.44 t$	0.99
	800	$\ln Conc = -2.90 t$	0.98	$\ln Conc = -2.90 t$	0.99
	1200	$\ln Conc = -3.38 t$	0.99	$\ln Conc = -3.30 t$	0.99
	1900	$\ln Conc = -3.77 t$	0.99	$\ln Conc = -3.65 t$	0.99
VAV/BPFS	400	$\ln Conc = -5.53 t$	0.98	$\ln Conc = -3.30 t$	0.99
	800	$\ln Conc = -6.80 t$	0.98	$\ln Conc = -3.60 t$	0.99
	1200	$\ln Conc = -8.03 t$	0.99	$\ln Conc = -4.00 t$	0.99
	1900	$\ln Conc = -9.70 t$	0.98	$\ln Conc = -4.47 t$	0.99

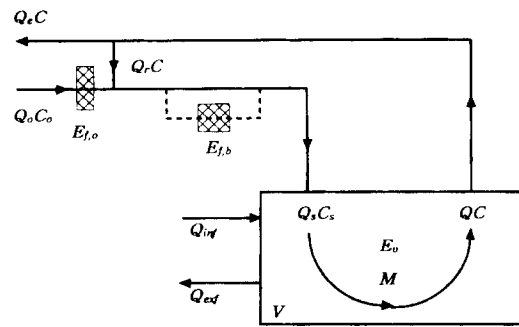
다. 또한 TVOC의 경우에는 VAV 시스템 사용할 때에는 2.44 hr<sup>-1</sup>에서 3.65 hr<sup>-1</sup>, VAV/BPFS를 사용할 때에는 3.30 hr<sup>-1</sup>에 4.47 hr<sup>-1</sup>로 총 감소율이 약 30 퍼센트 이상 증가하였다. 총 감소율에 따른 실내 공기 오염물질의 제거기전을 볼 때 기존의 VAV 시스템은 회석 효과에 의존하며, VAV/BPFS의 경우에는 회석과 여과 기전을 동시에 사용함으로써 실내공기질을 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. VAV/BPFS에서 TVOC와 실내 에어로졸의 총 감소율의 차이는 필터 효율에 의한 것으로 TVOC의 경우 고효율 필터를 사용할 때 보다 효과적으로 실내 유기성 오염 물질을 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

**2. 정화 공기 전달율(K<sub>CADR</sub>)을 이용한 실내공기질 모델**

실내공기질 모델은 실내 오염물질의 누적 농도를 효과적으로 예측 분석할 수 있는 기법이다. 물질수지식을 이용한 실내공기질 모델의 기본식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = M_g + M_c - M_r$$

V는 실내 공간의 부피(volume), C는 실내 오염물질의 농도(mass/volume), M<sub>g</sub>는 실내 오염물질의 발생원(mass·time), M<sub>c</sub>는 오염물질의 유입량(mass/time), M<sub>r</sub>는 실내 오염물질의 감소율(mass/time)이다. 본 연구는 위의 물질 수지식을 기초로 하여 오염물질이 실내로 유입 또는 발생 하였을 때 시간에 따른 실내 농도의 변화 예측식을 구하였다. 본 연구에서 사용된 환기 시스템과 chamber는 Fig. 2에 나타내었다. VAV/BPFS의 경우 chamber로부터 재순환되는 유량 Q<sub>r</sub>은 실외 공기유량 Q<sub>s</sub>와 합류되어 우회 필터(E<sub>f,o</sub>)를 통과 후 chamber로 공급되며, 기존 VAV 시스템은 Q<sub>r</sub>가 실외 공기필터(E<sub>f,o</sub>)를 거쳐 Q<sub>s</sub>와 합류 후 chamber내로 유입된다. 특히 VAV/BPFS의 합류 공기량 (Q<sub>s</sub>+Q<sub>r</sub>)의 정화 여부는 chamber내에 설치된 IAQ sensor에 의존하게 된다. VAV/BPFS의 우회 필터 시스템은 실내 공기중의 유해 물질의 농도가 높아진 경우에만 사용되며, 실내공기질이 깨끗할 경우에는 합류 공기를 정화하지 않고 chamber내로 직접 공급하게 된다. 즉 VAV/BPFS는 "Demand Control for IAQ"의 개념으로 작동하게 된다.



Legend)  
 M(Indoor source emission rate); C(Concentration of the chamber); C<sub>s</sub>(Concentration of outdoors); C<sub>v</sub>(Concentration of supply air); Q<sub>r</sub>(Return air flow rate); Q<sub>s</sub>(Recirculated air flow rate); Q<sub>c</sub>(Exhaust air flow rate); Q<sub>inf</sub>(Infiltration); Q<sub>ex</sub>(Exfiltration); Q<sub>o</sub>(Outdoor supply air flow rate); E<sub>f,o</sub>(Filter efficiency of outdoor air); E<sub>f,b</sub>(Bypass efficiency); E<sub>v</sub>(Ventilation effectiveness).

Fig. 2. Indoor air modeling.

물질 수지식을 이용한 VAV/BPFS의 수학적 모델의 기본식은 식 (1)과 같다.

$$V \frac{dC}{dt} = Q_s C_s E_v + M + Q_{inf} C_o E_v - Q C E_v - Q_{ex} C E_v \quad (1)$$

V는 chamber의 부피, C는 chamber로부터 배출되는 오염물질의 농도, C<sub>s</sub>는 chamber로 유입되는 오염물질의 농도, C<sub>o</sub>는 실외 공기의 오염 물질 농도, Q<sub>s</sub>는 chamber로 유입되는 공기 유량, Q<sub>r</sub>는 chamber로부터 배출되는 공기 유량, M은 chamber내의 오염 물질 발생량, E<sub>v</sub>는 환기 효율, Q<sub>inf</sub>는 자연 환기에 의해 chamber로 유입되는 유량, Q<sub>ex</sub>는 자연 환기에 의해 chamber로부터 유출되는 유량이다. 식 (1)에서 Q<sub>r</sub>C는 식 (2)와 같이 유도된다.

$$Q_r C = Q_r C (1 - E_{f,b}) + Q_o C_o (1 - E_{f,o}) (1 - E_{f,b}) \quad (2)$$

본 연구에서는 정화공기전달율(clean air delivery rate; K<sub>CADR</sub>)의 개념을 도입하여 식 (1)을 단순화하였다. K<sub>CADR</sub>은 실내 공간으로 유입되는 청정 공기의 총 유량율로서 실외공기 유입율(K<sub>o</sub>)과 재순환 공기 정화율(K<sub>r</sub>)의 합으로 식 (3)에 의해 구할 수 있다. V는 실내 공간의 부피이며, (Q<sub>s</sub>)는 배기량으로 물질 수지에 의해 실내로 유입되는 Q와 같고 (Q=Q<sub>s</sub>), Q<sub>o</sub>는 실외 공

기 유량, Q와 재순환 공기 유량이다. 즉  $K_{CADR}$ 은 VAV/BPFS에서는  $K_o$ 와  $K_f$ 의 합과 같으며, 기존 VAV 시스템에서는  $K_o$ 와 같다.

$$K_{CADR} = \frac{Q}{V} = \frac{Q_o}{V} + \frac{Q_f}{V} = K_o + K_f \quad (3)$$

또한  $K_o$ 와  $K_f$ 는 식 (4)와 (5)와 같이  $K_{CADR}$ 과 X의 형태로 치환할 수 있으며,  $X(=Q_o/Q)$ 는 실내에 유입되는 총 공기량에 대한 실외 공기량의 비이다.

$$K_o = \frac{Q_o}{V} = \frac{Q_o}{Q} K_{CADR} = X K_{CADR} \quad (4)$$

$$K_f = \frac{Q_f}{V} = (1 - \frac{Q_o}{Q}) K_{CADR} = (1 - X) K_{CADR} \quad (5)$$

식 (2)(4)(5)를 식(1)에 대입 후 재정리하고,  $Q_m$ 는  $K_m(=Q_m/V)$ 로,  $M/V$ 를 N으로 치환하여 미분하면 (초기조건  $t=0, C_i$ )식 (6)과 같다.  $C_{LVB}$ 는 우회 필터를 가진 VAV/BPFS를 사용할 때에 시간의 변화량에 따른 실내공간중의 농도 변화량이며, VAV 시스템의 시간에 따른 농도 변화량을 구하면 식 (7)과 같다.

$$C_{LVB} = \frac{[XK_{CADR}C_oE_v(1-E_{L,o})(1-E_{L,b})+N+K_mC_oE_v]}{E_v[K_n+K_{CADR}(X+E_{L,b}-XE_{L,b})]} + C_i e^{-E_v[K_n+K_{CADR}(X+E_{L,b}-XE_{L,b})]t} \quad (6)$$

$$C_{L,VAV} = \frac{[XK_{CADR}C_oE_v(1-E_{L,b})+N+K_mC_oE_v]}{E_v[K_n+XK_{CADR}]} + C_i e^{-E_v[K_n+K_{CADR}]t} \quad (7)$$

Fig. 3은 식 (6)을 사용하여 실내공기중의 에어로졸의 예측 농도와 실측 농도간의 상관성을 보여준다. 예측 농도와 실측 농도 간의  $r^2$ 가 0.98이상으로 매우 양호함을 보여 주었으며 각 열량의 변화는 상관계수에 영향을 주지 않았다. Fig. 4는 연속열량실험의 실측농도와 예측농도간의 변화량을 보여주는 것으로 chamber내에 열량과 오염발생원이 있는 시간대(40분-190분)에서는 예측농도와 실측농도간의 상관성이 매우 높았다. 본 모델은 VAV/BPFS의 우회 필터의 공기 정화 성능을 비교하기 위해 적용되었으며, 실내 공간 내의 화학적 반응등은 고려치 않았다. 그러나 각 공기 유량을 정화공기전달용의 개념으로 대치하여 간략화 함으로서 실내 오염물질의 농도를 예측하거나 실내공기질을 관리하는데 유용

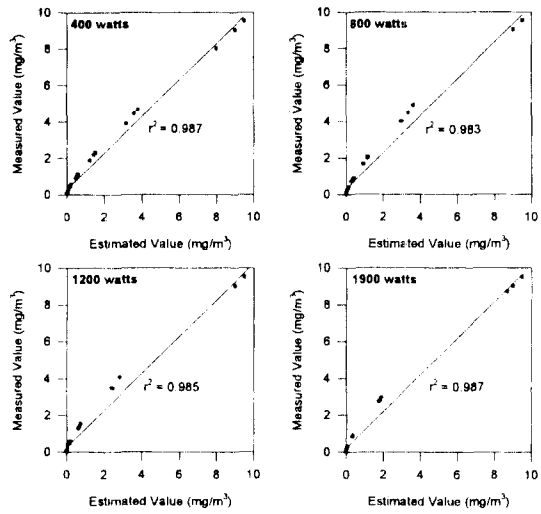


Fig. 3. Correlation coefficient of the measured versus estimated values with one energy load experiment.

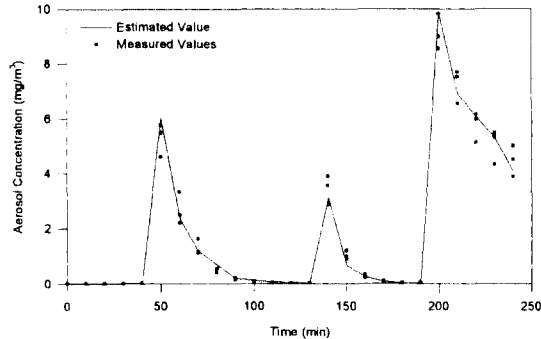


Fig. 4. Comparison of the measured values with the estimated ones with a stepwise increased energy load experiment.

하게 사용할 수 있다.

### 3. 실내공기질 모델의 응용

환기되는 공기의 질이 쾌적한 실내 환경유지를 위해 아주 중요한 요인으로 환기 공기는 적절한 처리를 거친 실외 공기 또는 정화 처리된 재순환 공기의 사용을 권장하고 있다. Fig. 5의 (a)는 기존 VAV 시스템의 예로서 실외 공기가 0 퍼센트에서 100 퍼센트 유입되었을 경우 실내 오염물질의 농도 변화를 예측한 것이다. 실외 공기의 유입에 따른 실내 오염물질의 감소 효과는 다른 실내공기질 모델과 거의 유사한 형태를 보여 준다. 특히 0 퍼센트는

환기 시스템내로 실외 공기가 유입되지 않음으로 실내 오염물질의 농도는 초기농도를 그대로 유지하나, 환기 시스템내로 실외공기의 유입량이 증가되는 기계 환기의 경우에는 실내 오염물질의 희석 효과가 증대되어 오염 물질이 매우 급격히 감소되는 현상을 보여 준다. 따라서 적정 실내공기질을 위해서는 100 퍼센트의 실외공기 유입이 가장 효율적이라고 볼 수 있다. 그러나 실외 공기의 유입은 환기 시스템의 에너지 소모량을 증대시킴으로 ASHRAE는 실내로부터 순환되는 공기의 재사용을 권장하고 있다. 즉 재

순환 공기를 정화하여 실내에 재공급함으로써 적정 공기질의 유지와 동시에 실외 공기를 대체함으로써 에너지 보전 효과를 얻을 수 있다. Fig. 5의 (b)는 재순환 공기의 정화 효과가 실내 오염도에 미치는 영향을 평가한 것으로 실외 공기의 유입량을 10 퍼센트로 일정하게 하고 우회 필터효율을 증가시켜 재순환 공기를 정화함으로써 얻을 수 있는 실외 공기의 대체 효과를 알아보고자 하였다. 우회 필터의 효율이 증가 시 (a)의 오염 물질의 농도 변화량과 거의 유사한 형태를 보여주었으며 우회 필터의 효율이 80 퍼센트 이

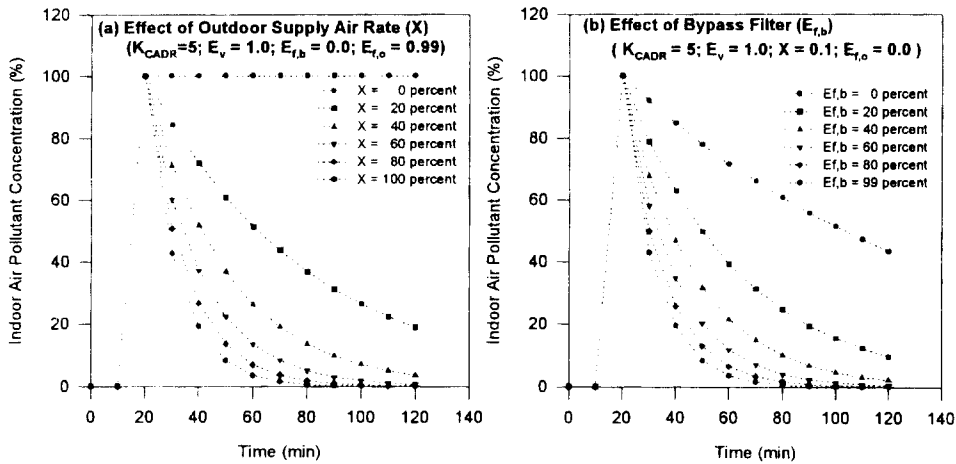


Fig. 5. Effect of outdoor supply air rate and bypass filtration on indoor air quality.

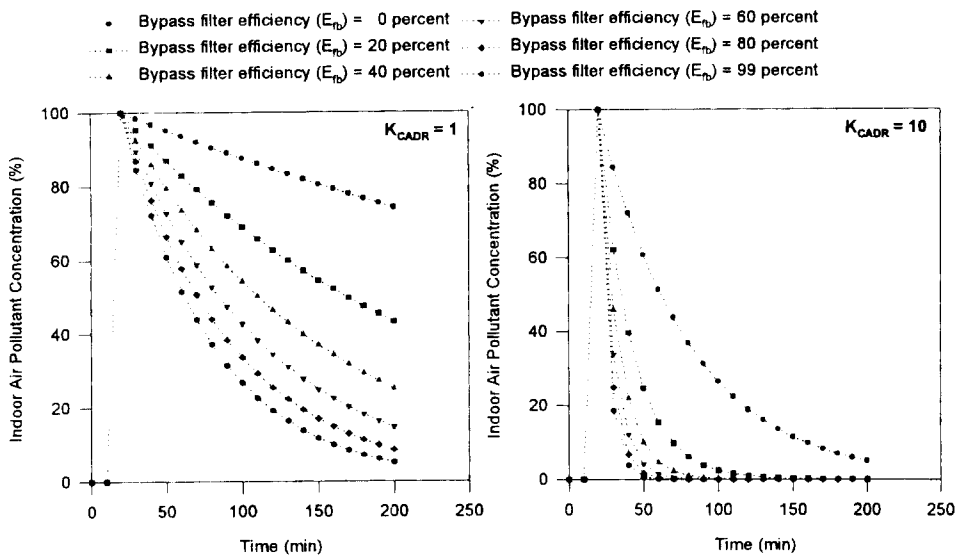


Fig. 6. Effect of clean air delivery rate on indoor air quality with  $X=0.1$ ,  $E_v=1.0$ .

상일 경우에는 실외 공기의 대체 효과가 매우 커짐을 알 수 있었다. 즉 필터의 효율에 따라 재순환되는 공기의 정화 효율은 달라지나 필터 효율이 증대될수록 실내 오염물질의 정화 효율이 커짐을 알 수 있다. 따라서 재순환 공기를 정화하여 재사용함으로써 실외 공기의 대체효과를 얻어 쾌적한 실내공기질을 유지할 수 있으며, 실외 공기를 난방/냉방하지 않으므로 이에 따른 에너지 대체효과를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 VAV/BPFS의 실외 공기의 유입량을 10 퍼센트로 일정하게 하고 정화 공기 전달율( $K_{CADR}$ )을 달리함으로써 실내 공기오염물질의 제거 효율에 미치는 영향을 비교한 것이다. VAV/BPFS의 경우 정화 공기 전달율이 커짐으로서 실내 공기오염물질의 제거 효율이 증대됨을 알 수 있었다. 즉  $K_{CADR}$ 이 1인 경우와 10인 경우를 비교시 실내 공간으로 유입되는

총 공기량( $Q_s$ )에 대한 실외 공기의 유입량비( $Q_o/Q_s$ )가 10 퍼센트, 재순환 공기의 비( $Q_r/Q_s$ )가 90 퍼센트로 일정하나 정화 공기 전달율이 10 만큼 증대됨으로 실내 오염물질의 농도는 급속하게 감소됨을 알 수 있다. 즉 VAV/BPFS의 경우 적정 정화공기전달율을 유지함으로써 보다 효율적으로 실내 오염물질을 제거할 수 있었다.

VAV/BPFS의 우회 필터의 실내 오염물질의 제거 효과는 두 시스템의 시간에 따른 농도비의 변화량으로 평가하였으며 농도비(concentration ratio= $C_{VAV}/C_{VAV/BPFS}$ )는 식 (6) (7)의 비로서 계산하였다. 즉 농도비가 1인 경우는 실내 오염물질의 제거 효과가 두 시스템간의 차이가 없는 것이며, 농도비가 1이상일 경우에는 VAV/BPFS가 기존 VAV시스템에 비해 실내 오염물질의 제거효율이 증대됨을 나타낸다. 각 조건

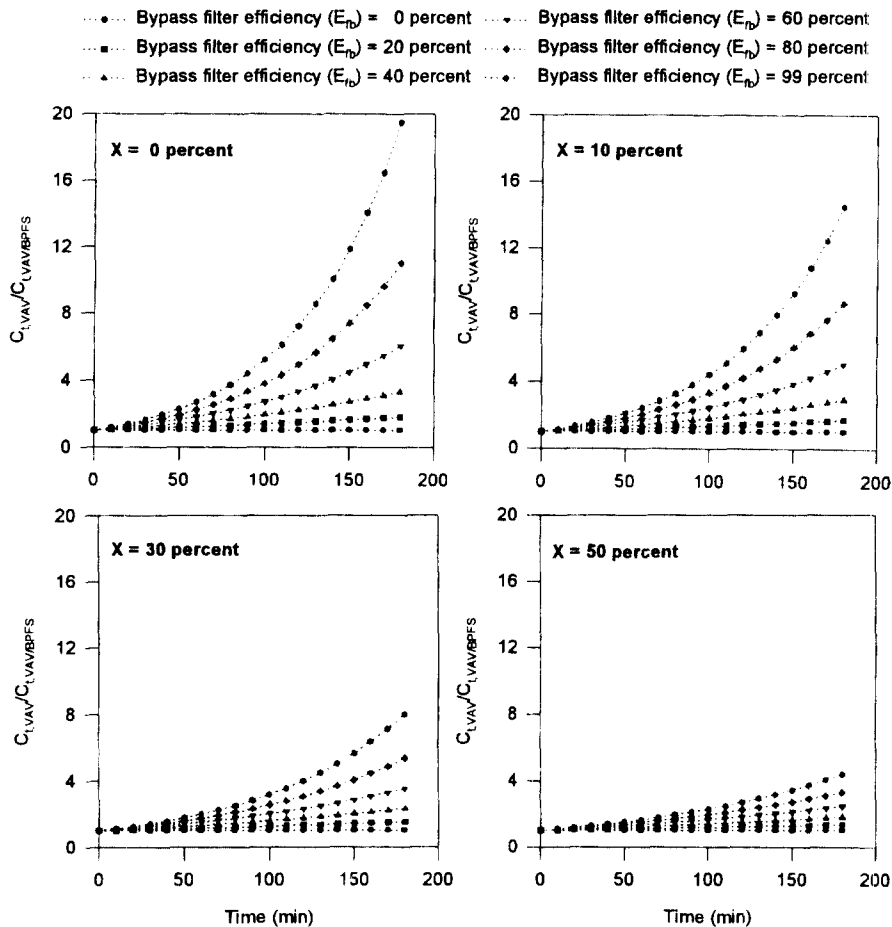


Fig. 7. Effect of outdoor supply air rate of indoor air quality with  $K_{CADR}=1$ ,  $E_o=1.0$ .

에 따른 시간별 농도비는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 VAV/BPFS 사용자 실외공기의 유입비(X)의 변화가 실내공기질에 미치는 영향을 평가한 것으로 정화공기 전달율( $K_{AIR}$ )과 환기효율( $E_v$ )은 1로 일정하게 하였다. 실외 공기의 유입비 (X)가 0 퍼센트에서 50 퍼센트로 증가될수록 각 시간별 농도비가 감소되어, 우회 필터에 따른 실내 오염물질의 제거 효율이 떨어짐을 알 수 있다. 특히 실외 공기의 유입비가 50 퍼센트인 경우에는 농도비의 차이가 매우 적어짐으로 VAV/BPFS의 여과에 따른 실내 오염물질 정화 효율이 감소됨을 알 수 있다. 반면에 실외 공기의 유입비가 0 또는 10퍼센트인 경우에는 농도비가 매우 커져 VAV/BPFS가 기존의 VAV시스템에 비해 효과적으로 실내 오염물질을 제거함을 알 수 있다. 특히 실내 공간내로 Q가 전혀 유입이 되지 않는 X=0 퍼센트 조건에선 실

내 오염물질의 제거율은 우회필터에 전적으로 의존하게 된다. 결과적으로 VAV/BPFS는 실외 공기의 유입량을 최소화할 경우 기존 VAV시스템에 비해 실내 오염물질의 제거효율이 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 8은 실외 공기의 유입비 X가 10 퍼센트, 정화공기 전달율( $K_{AIR}$ )은 1로 일정할 경우 환기 효율 ( $E_v$ )이 실내 공기오염물질의 농도비에 미치는 영향을 비교한 것이다. 모든 실내공기질 모델과 같이  $E_v$ 가 1 인 경우 실내 오염물질의 제거효율이 가장 높았으며,  $E_v$ 가 낮아질수록 제거효율은 감소됨을 알 수 있다. 즉 환기시스템의 실내 오염물질의 성능이 탁월하여도 실내 공간의 환기 효율이 적어질 경우에는 실내 오염물질의 제거효율이 감소됨으로, 실내 공간의 환기를 위한 유입구와 배기구를 선정시 매우 유의해야함을 보여준다.

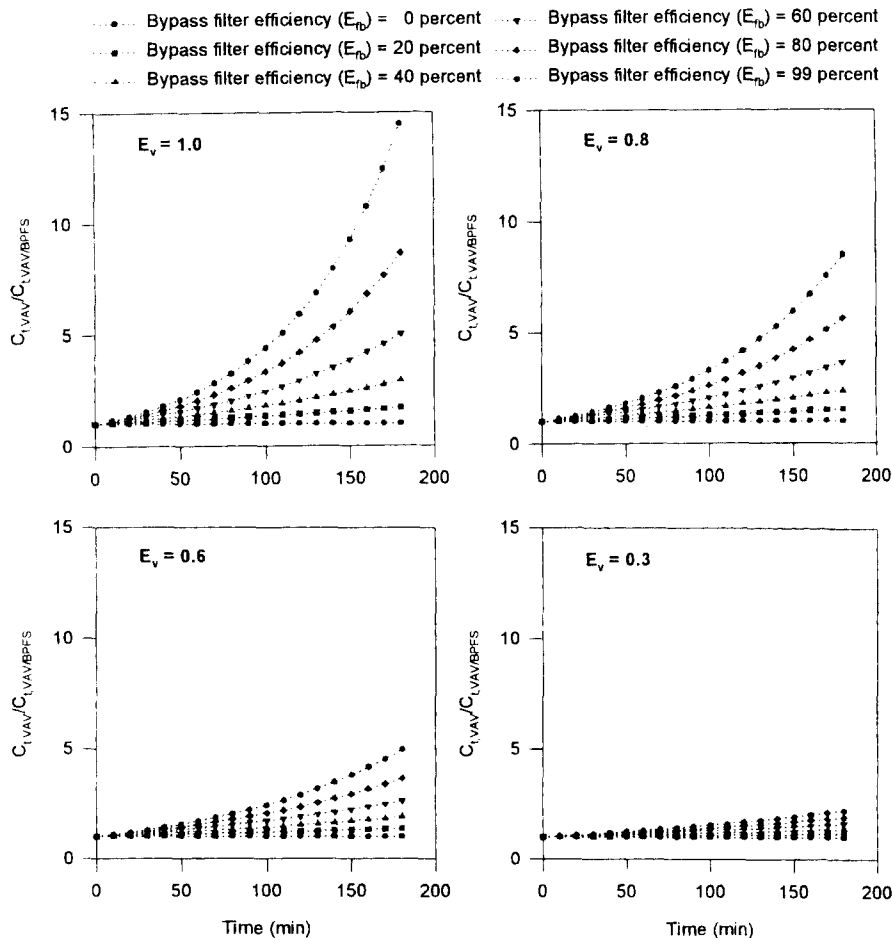


Fig. 8. Effect of ventilation effectiveness on indoor air quality with X=0.1,  $K_{AIR}=1$ .



## IV. 결 론

거주공간의 실내공기질과 실내온도 안락조건(thermal comfort condition)은 인간의 건강과 정서에 큰 영향을 미치고 있다. 일반적으로 실내공기질분지는 단열재등에 의한 밀딩의 밀폐화, 건축자재등에 의한 유해 물질의 오염원 산재, 환기율의 감소등이 중요한 원인이 되어 발생한다. 이로 인한 건강장애는 악취에 의한 불쾌감, 밀딩 증후군 현상과 같은 단기적 인체유해, 낮은 농도의 유해성 물질에 장기간 폭로되어 유발될 수 있는 암 등과 같은 장기적인체유해등 여러 가지 형태로 나타나고 있다.

실내공기질과 관련된 가장 중요한 문제는 실내 오염물질의 누적화 현상으로 실내 오염원의 다양성과 적은 환기율등이 복합되어 나타난다. 실내 오염물질의 누적화 현상을 방지하기 위한 최선의 방안은 실내 오염원을 제거하는 것이나 현실적으로 용이하지 않으며, 가장 효율적인 방법은 실외공기의 유입량을 크게 하거나, 공기정화기로 오염된 공기를 여과하여 재공급함으로써 환기율을 증가시키는 것이다. 실외공기의 유입량의 증가는 에너지 소비와 관련됨으로, 공기정화가 적정 실내공기질을 유지하기 위해 우선적으로 선택된다. 본 연구에서 사용된 VAV/BPFS는 우회 필터를 사용하여 환기 시스템내의 에너지 소비량을 최소화하면서 적정 실내공기질을 유지하도록 설계되어 있다. 본 연구는 우회 필터를 가진 VAV/BPFS가 실외 공기의 증가 없이 실내 오염물질을 효과적으로 제거하는가를 실험하기 위하여 동일 조건하에서 단일 열량 실험과 연속 열량 실험을 각 3회씩 반복하여 실험하였다. 또한 VAV/BPFS와 기존의 VAV시스템과 농도비를 비교하기 위해 정화 공기 전달율을 이용한 실내공기질 모델을 적용하여 VAV/BPFS의 시스템 성능을 분석하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, 단일 열량 실험과 연속 열량 실험의 결과 VAV/BPFS가 기존의 VAV시스템에 비해 실내 오염물질을 효과적으로 제거하였다. VAV/BPFS 사용할 때 실내 에어로졸의 총 감소율의 기존 VAV시스템에 비해 약 2배 이상 증가하였으며, TVOC의 총 감소율은 약 30 퍼센트 이상 증가하여 VAV/BPFS가 실내공기질 제어에 매우 효과적임을 보여 주었다. 둘째, 정화 공기 전달율을 이용한 실내공기질 모델은 예측농도와 실측농도간의 상관계수가 0.98이상이었으며, 실측농도를 적절하게 예측하였다. 셋째, 농도비를 이용한 두 시스템간의 성

능 비교시 VAV/BPFS는 실외 공기의 유입비가 적어질수록 우회 필터에 의한 여과효율이 증가됨을 보여주었다.

동일 실험 조건하에서 두 환기 시스템간의 총 감소율과 실내공기질 모델을 비교 분석한 결과 VAV/BPFS가 기존의 VAV 시스템에 비해 효과적으로 실내 오염물질을 감소시켰다. 더욱이 VAV/BPFS는 실외 공기의 유입량을 최소화함으로써 실내 오염물질의 제거 효율이 증대되어 에너지를 적게 소비함을 예측할 수 있었다. 본 연구는 모든 조건이 통제된 chamber내에서 수행되었으므로 향후 VAV/BPFS를 실제 거주공간에 설치하여 에너지 효율성 실험과 실내공기질 평가 및 모델의 유용성이 재평가 되어야 한다. 그러나 본 실험의 결과와 실내공기질 모델에 따른 예측 결과를 볼 때 VAV/BPFS가 실내공기질과 에너지 소비량을 효율적으로 제어함으로 실내 공기오염의 새로운 전략으로 제시하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 1996년도 계명대학교 신진비사 연구기금으로 이루어졌음으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Hedge A., Sterling T.D., Sterling E.M., Sterling, D.A. and Nie V.: Indoor air quality and health in two office buildings with different ventilation systems. *Environment International*, 15, 115-128, 1989a.
- 2) Von Dongen J.E. and Phaff J.C.: Ventilation behavior and indoor air problems in different types of newly built dwellings. *Environment International*, 15, 1-6, 1989.
- 3) Grot R.A., Hodgson A.T., Daisey J.M. and Persily A.: Indoor air quality evaluation of a new office building. *ASHRAE J.*, 33(9), 16-25, 1991.
- 4) Møllhave L. and Thorsen M.: A model for investigations of ventilation systems as sources for volatile organic compounds in indoor climate. *Atmospheric Environment*, 25a, 241-249, 1991.
- 5) Haghighat F., Zmeureanu R. and Domini G.: Energy saving in buildings by demand controlled ventilation system. *Proceedings of Indoor Air '93*, 5, 51-56, 1993.
- 6) ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers): *Fundamentals ASHRAE Handbook & Product Directory*, Atlanta G.A., ASHRAE Publications, 1995.

- 7) ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers): ASHRAE Standard 62-1989. Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta G.A., ASHRAE Publications, 1985.
- 8) Drye E.E., Ozkaynak H., Burbank B., Billick P.E., Backer P.E., Spengler J.D., Ryan P.B. and Colome S.D.: Development of models for predicting the distribution of indoor nitrogen dioxide concentration. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 39(9), 1169-1177, 1988.
- 9) Turk A.: Measurements of Odorous vapors in test chambers. *ASHRAE J.*, 5, 55, 1963.
- 10) Shair F.H. and Heitner K.L.: Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside. *Environmental Science & Technology*, 8(5), 444-451, 1974.
- 11) Ishizu Y.: General equation for the estimation of indoor pollution. *Environmental Science & Technology*, 14(10), 1254-1257, 1980.
- 12) Hayes S.R.: Use of an indoor air quality model (IAQM) to estimate indoor ozone levels. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41, 161-170, 1991.
- 13) Spark L.E.: Indoor air quality model version 1.0. EPA-600/8-88-097a. U.S. EPA, Research Triangle Park, N.C., 1988.